

WYKORZYSTANIE NARZĘDZI TEORII GIER DO ANALIZY MECHANIZMÓW RYNKU ENERGII

Przemysław Kacprzak, Piotr Pałka, Mariusz Kaleta,
Kamil Smolira, Eugeniusz Toczyłowski

Słowa kluczowe: rynek bilansujący energii elektrycznej, teoria gier

Streszczenie. Analiza złożonych mechanizmów rynkowych może być prowadzona w oparciu o modele teoriogrowe. W niniejszej pracy rynek bilansujący energii elektrycznej jest modelowany jako pewna gra pomiędzy uczestnikami rynku. Pozwala to na badanie wybranych własności mechanizmu rynkowego postrzeganego jako gra. W pracy zastosowano kilka metod analizy gry rynkowej, takich jak: analiza macierzy wypłat, symulacja gry rynkowej oraz badanie punktów równowagi rynkowej za pomocą modeli równowagowych. Celem stosowania szerokiego spektrum metod analizy jest osiągnięcie jak najszerszej wiedzy na temat badanego mechanizmu rynkowego oraz uwiarygodnienie eksperymentów obliczeniowych. Analizy przeprowadzono na prostym przykładzie mechanizmu cen węzłowych LMP badając pewne ciekawe punkty w przestrzeni rozwiązań. Metody analizy mogą być przydatne przy projektowaniu i weryfikacji jakości mechanizmów bilansowania rynku energii.

1. WSTĘP

Zagadnienie projektowania skutecznych mechanizmów rynku bilansującego energii elektrycznej wciąż pozostawia wiele nierozwiązanych i trudnych kwestii. Jednym z kluczowych elementów jest brak wypracowanych, dobrych kryteriów oceny rozwiązań. W efekcie w wielu krajach możemy obserwować wdrażanie rozwiązań niekompletnych, które po pewnym czasie ujawniają swoje złe cechy i wymagają kroków naprawczych.

Złożoność problematyki jest efektem bogatych zależności i interakcji wielu graczy, dążących do realizacji indywidualnych celów. W tej sytuacji uproszczona analiza systemowa zakładająca pewne statyczne strategie zachowań poszczególnych graczy okazuje się niewystarczająca, w szczególności w zderzeniu z wymaganiami praktycznymi. Analiza zachowań graczy jest dziedziną teorii gier, która dostarcza szeregu pożytecznych metod badawczych.

W niniejszej pracy omawiamy zastosowanie wybranych narzędzi teorii gier, które mogą skutecznie wspomagać analizę mechanizmów rynku bilansującego energii elektrycznej. Celem stosowania szerokiego spektrum metod analizy jest osiągnięcie jak najszerszej wiedzy na temat badanego mechanizmu rynkowego oraz uwiarygodnienie i uogólnienie wiedzy dotyczącej poszczególnych mechanizmów. Proponowane narzędzia, istotnie wzbogacające metodykę badawczą mechanizmów rynku bilansującego energii elektrycznej, zostały zastosowane do analizy ciekawego przykładu obliczeniowego.

2. RYNEK ENERGII JAKO GRA RYNKOWA

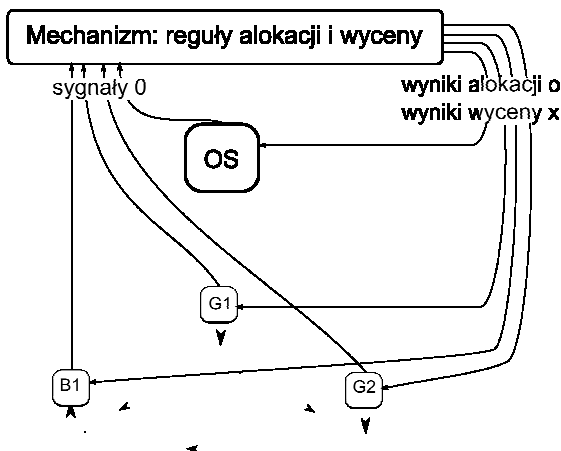
Każdy rynek, tak więc i rynek bilansujący, może zostać zamodelowany jako gra pomiędzy jego uczestni-

kami. Podejście to może być stosowane w celu zbadania pewnych własności gry, np. osiągania punktów równowagi [5] (Nasha, Bayesa-Nasha) oraz ich stabilności.

Zakładamy grę pomiędzy podmiotami rynkowymi uczestniczącymi w rozliczeniu. Wyniki gry, czyli zalokowane oferty oraz wyznaczone ceny, zależą od reguł zastosowanego mechanizmu rynkowego. Gra jest grą n -osobową, graczem może być każdy sprzedawca i każdy nabywca. Wszyscy uczestnicy gry – gracze (na rysunku 1 oznaczeni literami G_i – sprzedawcy energii oraz B_i – nabywcy energii) będą dążyli do maksymalizacji swojej indywidualnej użyteczności. Sprzedawcy i nabywcy mają możliwość grania pewnymi parametrami składanych ofert. Rozpatrywana gra jest grą o sumie niezerowej – oznacza to, że osiąganie zysków przez jednego z graczy nie musi oznaczać strat dla innych uczestników. W ramach rozgrywki mechanizm rynkowy wyznacza wyniki, które następnie są przekazywane do uczestników gry. Zakładamy, że poszczególni gracze nie mogą się ze sobą porozumiewać – mamy więc do czynienia z grą niekooperacyjną.

Rysunek 1 przedstawia zależności pomiędzy handlem a grą rynkową. Przedstawiono sytuację handlu energią w prostej, trójwęzłowej sieci przesyłowej. Uczestnicy rynku oznaczenie są literami $G1$, $G2$ i $B1$. Uczestnicy ci są również graczami w pewnej grze rynkowej – konkurują grając swoimi parametrami ofertowymi. Każdy z graczy jest umiejscowiony w pewnym konkretnym węźle sieci przesyłowej N_i ; co ogranicza (lub rozszerza) w pewien sposób możliwości jego handlu (a więc także i gry). Zakładamy, że użyteczność każdego gracza będzie równa wielkości jego indywidualnego dochodu oraz że pewne dane opisujące użyteczność będą wartościami prywatnymi

– nie będą znane operatorowi systemu, który przeprowadza rozliczenie (na rysunku 1 oznaczony literami OS) ani mechanizmowi bilansującemu.



Rys. 1. Gra na rynku energii przedstawiona jako mechanizm rynkowy

Proponujemy kilka metod analizy gry rynkowej, które w dalszej części raportu będziemy nazywali *narzędziami analizy*. Od wybranego sposobu analizy i narzucanych przez niego założeń oraz uproszczeń, może zależeć osiągnięty wynik. Proponujemy zatem pewne spektrum narzędzi, aby osiągnąć jak najszerszą wiedzę na temat przykładów i, co za tym idzie, poszczególnych mechanizmów.

3. NARZĘDZIA ANALIZY

3.1. Model równowagowy

Analiza mechanizmu z wykorzystaniem modelu równowagowego pozwala bezpośrednio wyznaczać strategie maksymalizujące zyski poszczególnych uczestników tworzące tzw. punkty równowagi Nasha. Punkt równowagi Nasha to taki stan gry, przy którym żadnemu z graczy nie opłaca się samodzielnie odejść od swojej strategii, gdyż każdy gracz osiąga maksymalny zysk możliwy przy ustalonych decyzjach pozostałych graczy.

Zadanie znalezienia punktu równowagi Nasha dla mechanizmu rynkowego można zapisać jako następujące zadanie programowania matematycznego, nazywane *modelem równowagowym*:

$$\theta_j \in \arg \max_{\theta_j \in \Theta_j} Z_j(o_j, x_j) \quad (1)$$

$$o = \xi(\theta) \quad (2)$$

$$x = \eta(\theta, o) \quad (3)$$

gdzie θ_j jest decyzją (wektorem decyzji) gracza j , która musi się zawierać w zbiorze decyzji dopuszczalnych Θ_j tego uczestnika. Każdy z graczy podej-

muje decyzje, które maksymalizują jego zysk Z_j , który zależy od wyników alokacji $o = (o_j)$ i wypłat $\xi = (\xi_j)$.

Nie ma ogólnych metod rozwiązania takiego zadania, natomiast występują metody dla pewnych szczególnych przypadków. W naszych badaniach stosujemy często rozważany w literaturze model komplementarny gry Cournota [2,3]. W grze Cournota uczestnicy grają realizowanym wolumenem, natomiast ceny wynikają z ogółu realizacji transakcji.

3.2. Analiza macierzy wypłat

Istotą tego podejścia jest zbudowanie macierzy wypłat gry [5], a następnie jej analiza. Zbudowanie macierzy wypłat oznacza przebadanie punkt po punkcie przestrzeni potencjalnych cen oferowanych przez podmioty. Celem analizy jest znalezienie charakterystycznych punktów, jakie mogą zostać osiągnięte w trakcie rozwiązania zadania. Za pomocą tej techniki można wyznaczyć pewne szczególne punkty rozważane przez teorię gier: punkty równowagi Nasha oraz punkty tzw. równowagi w strategiach dominujących. Można także wyznaczyć punkty globalnie efektywne – w których suma dochodów jest największa, a także punkty w których poszczególni gracze osiągają maksymalne dochody. W końcu za pomocą tej techniki możliwe jest wyznaczenie zbioru punktów Pareto-efektywnych, czyli takich rozwiązań, w których nie można poprawić wyniku pojedynczego gracza, bez pogorszenia sytuacji pozostałych graczy [6].

Dla celów analizy macierzy wypłat zakładamy, że na rynku istnieje pełna informacja: istnieje pełen stan wiedzy o działaniach każdego z uczestników rynku i każdy uczestnik rynku posiada tę informację. Założenie to będzie potrzebne do wyznaczenia pewnych punktów, charakterystycznych dla rozgrywki (np. punktów równowagi, punktów w których maksymalizowana jest sumaryczna nadwyżka ekonomiczna itp.).

Aby określić charakterystyczne punkty gry, należy przebadać zachowanie się mechanizmu bilansowania dla różnych cen ofertowych zgłaszanych przez graczy.

3.3. Symulacja gry rynkowej

W symulacji komputerowej gry rynkowej zakłada się pewne modele obliczeniowe dla mechanizmu rynkowego oraz pewne strategie działań poszczególnych graczy. Konieczne jest również założenie, że gra jest powtarzalna, wieloetapowa. Każdy z uczestników ma możliwość reakcji na strategię innych graczy. Możliwe jest wykorzystanie wiedzy (na temat działań innych graczy – ich preferencji, zachowań) otrzymanej podczas poprzednich rozgrywek – gracze mogą uczyć

się, a następnie wykorzystywać zdobytą wiedzę w celu maksymalizacji swojej użyteczności.

W symulacji zastosowano modyfikację strategii Best Response [1]. Działanie strategii Best Response polega na poszukiwaniu przez danego gracza najlepszej odpowiedzi na bieżącą strategię przeciwnika. Modyfikacja polega na tym, iż gracz nie jest w stanie przeszukać całego spektrum swoich możliwych ruchów, tak więc poszukuje swojej najlepszej odpowiedzi tylko w pewnych, określonych z góry punktach. Zmodyfikowaną strategię nazwano quasi-Best Response.

Strategia ta zakłada poszukiwanie swojej najlepszej odpowiedzi (oferty) w pewnym otoczeniu bieżącej ceny oferowanej przez gracza, oraz w otoczeniu cen ofertowych oferowanych przez przeciwników. Gracze przy poszukiwaniu najlepszej odpowiedzi, kierują się kryterium dochodu.

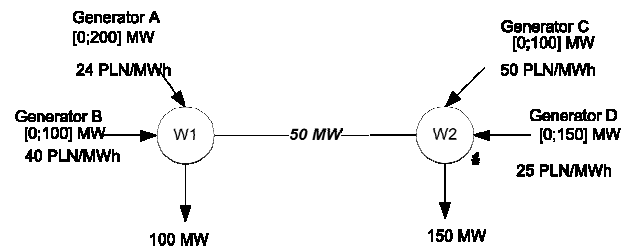
Typowe zastosowanie symulacji komputerowej jest związane z próbą potwierdzenia, bądź zaprzeczenia wyników teoretycznych otrzymanych innymi metodami. Poza tym, umożliwia zbadania zbieżności do pewnych punktów równowagi wyznaczonych na podstawie innych analiz.

4. PROSTY PRZYKŁAD

Rozważmy prostą sieć dwuwęzłową przedstawioną na rysunku 2, z linią przesyłową, której ograniczenie termiczne powoduje, że w ciągu jednego etapu bilansowania można przesłać nią maksymalnie 50 MW energii. Dla uproszczenia obliczeń zakładamy, że straty energii są pomijalnie małe. W węźle pierwszym znajduje się dwóch wytwórców: G1 o maksymalnych zdolnościach wytwórczych $p_1^{\max}=200$ PLN/MWh i rzeczywistym zmiennym koszcie produkcji $s_1=24$ PLN/MWh oraz G2 o $p_2^{\max}=100$ MWh i $s_2=40$ PLN/MWh. W węźle drugim także znajduje się dwóch wytwórców: G3 o $p_3^{\max}=100$ MWh i $s_3=50$ PLN/MWh oraz G4 o $p_4^{\max}=150$ MWh i $s_4=25$ PLN/MWh. W obydwu węzłach znajdują się sztywne odbiory energii o zapotrzebowaniach odpowiednio $d_1=100$ MWh oraz $d_2=150$ MWh. Z racji, że podmioty działają strategicznie, ich rzeczywiste koszty są informacją prywatną i zgłaszane ceny ofertowe mogą się od nich różnić. Ustalmy, że aktywnymi graczami będą najbardziej konkurencyjni wytwórcy G1 i G4.

W eksperymentach, jako mechanizm rynkowy przyjęliśmy metodę LMP (*Locational Marginal Pricing*) [8]. Mechanizm ten jest powszechnie stosowany na światowych rynkach energii i cechuje się wyznaczeniem zlokalizowanych cen rozliczeniowych dla każdego węzła sieci przesyłowej. Ceny w węzłach są

zróżnicowane, gdy mamy do czynienia z aktywnymi ograniczeniami przesyłowymi bądź stratami, a ich różnica odpowiada kosztowi przesyłu energii pomiędzy poszczególnymi węzłami.



Rys. 2. Dwuwęzłowa sieć przesyłowa z czterema wytwórcami i dwoma sztywnymi odbiorami

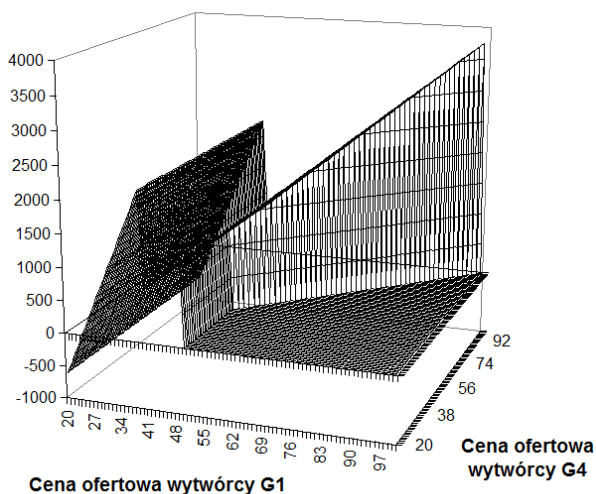
4.1. Przestrzeń punktów globalnie efektywnych

Punkty globalnie efektywne zostały obliczone za pomocą macierzy wypłat. Łączne dochody osiągane przez wszystkich wytwórców są uzależnione od relacji istniejącej pomiędzy graczami. Najwyższa wartość łącznych dochodów jest osiągana, gdy wytwórca G1 składa ofertę po cenie niższej od 40 PLN/MWh, czyli gdy wytwórca ten jest bardziej konkurencyjny od G2, oraz gdy wytwórca G4 składa ofertę po cenie niższej od 50 PLN/MWh, czyli gdy wytwórca ten jest bardziej konkurencyjny od G3. W każdym innym przypadku łączne dochody są niższe. Pożądaną strategią ze względu na maksymalizację tego kryterium jest więc składanie przez wytwórców G1 i G4 takich właśnie cen.

4.2. Przestrzeń punktów indywidualnie efektywnych

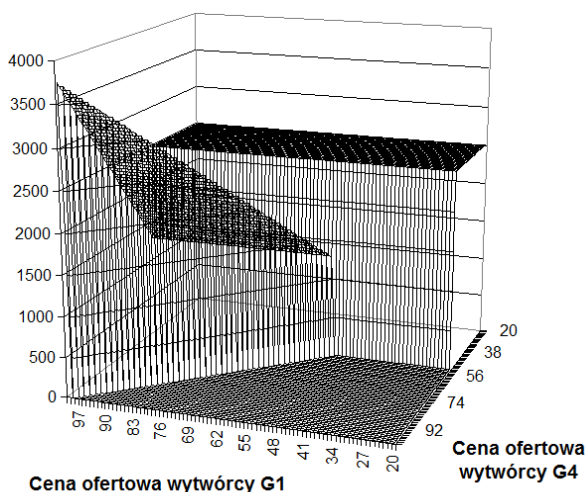
Na rysunku 3 przedstawiono dochody wytwórcy G1. Dopóki wytwórca ten nie przekroczy ceny ofertowej 40 PLN/MWh (oferowanej przez G2), wówczas jego dochody zależą wyłącznie od jego ceny ofertowej. Produkuje on wówczas 150 MWh energii, więc dla $s_1=40-\epsilon$, jego dochody wynoszą $2400-\epsilon$ PLN. Po przekroczeniu ceny ofertowej 40 PLN/MWh, jego dochody (oraz jego punkt pracy) zależą od ceny oferowanej przez gracza G4. Gracz G1 osiąga dodatni dochód dla $s_1 < s_4$. Na osi równych cen ofertowych $s_1=s_4$ widoczny jest uskok spowodowany zmianą alokacji wytwórcy G1 z 50 MWh (gdy cena $s_1 < s_4$) na 0 MWh (gdy cena $s_1 > s_4$). Najwyższa wartość dochodu dla tego wytwórcy występuje w punkcie $s_1=s_4-\epsilon$. Z racji, że popyt jest sztywny, w przypadku zgodnego działania G1 i G4 dochód maksymalny dąży do nieskończoności (należy pamiętać o tym, że jest to symulacja, a nie przykład rzeczywisty). Parametr ϵ jest bardzo małą wartością, większą od zera.

Dochody wytwórcy G1



Rys. 3. Indywidualne dochody wytwórcy G1 w zależności od cen ofertowych graczy

Dochody wytwórcy G4



Rys. 4. Indywidualne dochody wytwórcy G4 w zależności od cen ofertowych graczy

Na rysunku 4 przedstawiono dochody wytwórcy G4. Dopóki wytwórca ten nie przekroczy ceny ofertowej 50 PLN/MWh (oferowanej przez G3), wówczas jego dochody zależą wyłącznie od jego ceny ofertowej. Produkuje on wówczas 100 MWh energii i osiąga dochód równy 2500[PLN]. Po przekroczeniu ceny ofertowej 40 PLN/MWh przez obu graczy, jego dochody (oraz jego punkt pracy) zależą od ceny oferowanej przez gracza G1. Gracz G4 osiąga dodatni dochód dla $s_1 > s_4$. Na osi równych cen ofertowych $s_1 = s_4$ widoczny jest uskoki spowodowany zmianą alokacji wytwórcy G4 z 50 MWh (gdy cena $s_1 < s_4$) na 0 MWh (gdy cena $s_1 > s_4$). Najwyższa wartość dochodu dla tego wytwórcy występuje w punkcie $s_4 = s_1 - \varepsilon$. Z racji,

że popyt jest sztywny, dochód maksymalny dąży do nieskończoności.

4.3. Rozwiązanie modelu równowagowego

Aby możliwe było uzyskanie rozwiązania modelu równowagowego, konieczne było przekształcenie zadania do postaci lepiej uwarunkowanej obliczeniowo. W szczególności wygładzana jest funkcja wartości dualnej (poprzez przybliżanie funkcją różniczkowalną) ograniczenia na przepustowość linii przesyłowej, a sztywny popyt został zastąpiony popytem o małej elastyczności cenowej.

Ze względu na te konieczne uproszczenia i przybliżenia, model równowagowy dał wyniki stanowiące przybliżenie efektywnego punktu równowagi rynkowej, w którym cena w węźle 1 wynosi 40 PLN/MWh, zaś w węźle 2 wynosi 50 PLN/MWh. Wytwórca G1 produkuje 149,9 MWh energii, wytwórca G2 i G3 nie produkuje, zaś wytwórca G4 produkuje 100,1 MWh energii.

Zmniejszanie produkcji przez G1 jest nieopłacalne, gdyż w wyniku tego wytwórca G2 rozpocząłby produkcję, a w rezultacie zmniejszyłaby się produkcja G1 przy jednoczesnym braku istotnych zmian ceny w węźle 1. Próba zwiększania produkcji G1 doprowadziłaby do większego odbioru w węźle 1 (co znacznie obniżyłoby cenę) oraz do większego przesyłu, co znacznie zwiększa cenę przesyłu.

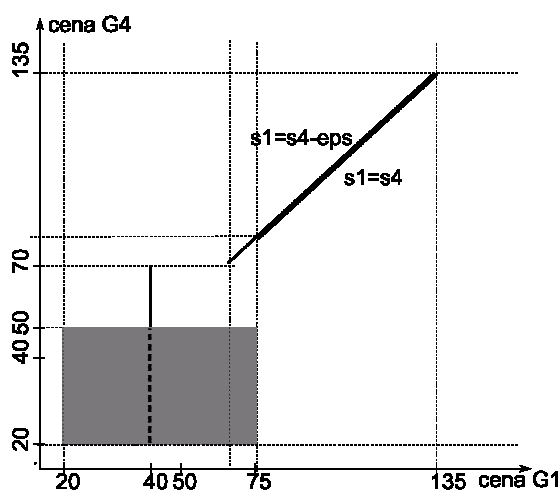
Podobnie w przypadku G4 – zmniejszenie produkcji prowadziłoby do włączenia się wytwórcy G3, a zwiększenie doprowadziłoby do znacznego spadku cen wynikającego ze sztywnego popytu.

4.4. Punkty równowagi Nasha

Aby zbadać istnienie punktów równowagi Nasha musimy zbadać funkcje najlepszych odpowiedzi wytwórcy G1 na strategię wytwórcy G4, oraz najlepszej odpowiedzi wytwórcy G4 na strategię wytwórcy G1. Funkcje najlepszych odpowiedzi wytwórców na strategię przeciwników znajdują się na rysunku 5.

Funkcja najlepszej odpowiedzi wytwórcy G4 na strategię wytwórcy G1 składa się z dwóch części: pierwsza z nich leży w przedziale $s_4 < 70$ i jest to prosta o równaniu $s_1 = 40 - \varepsilon$. Odpowiada ona sytuacji gdy wytwórca G1, bardziej konkurencyjny od G2, produkuje 150 MWh energii – jego zysk w tym przypadku wynosi 2400- ε PLN. Druga część wykresu leży w przedziale $s_4 \geq 70$ – jest to prosta o równaniu $s_1 = s_4 - \varepsilon$. Odpowiada to sytuacji gdy wytwórca G1, jako mniej konkurencyjny od G2, produkuje 50 MWh energii i ustala cenę w węźle W1 równą swojej cenie ofertowej.

Funkcja najlepszej odpowiedzi wytwórcy G4 na strategię wytwórcy G1 składa się z dwóch części: pierwsza z nich leży w przedziale $s_1 < 75$ i jest to multifunkcja, spełniająca warunek $s_4 < 50$. W tej sytuacji, wytwórca G4 jest bardziej konkurencyjny niż wytwórca G3 i produkuje 100 MWh energii. Osiąga on wówczas dochód równy 2500 PLN. Druga część wykresu leży w przedziale $s_1 \geq 75$ i jest to prosta o równaniu $s_1 = s_4$. Tę część najlepszej odpowiedzi można interpretować jako sytuację, gdy wytwórca G4 jest mniej konkurencyjny i produkuje 50 MWh. Ustala on cenę w węźle W2 równą swojej cenie ofertowej.



Rys. 5. Funkcje najlepszych odpowiedzi na strategię przeciwnika oraz punkty równowagi Nasha (linia przerywana)

W punktach przecięcia multifunkcji najlepszych odpowiedzi znajdują się punkty równowagi Nasha (patrz Rys. 5, linia przerywana). Na podstawie powyższej analizy, istnieje nieskończenie wiele punktów równowagi Nasha: znajdują się one na odcinku prostej o równaniu $s_1 = 40 - \epsilon$, ograniczonej z góry przez warunek $s_4 < 50$. W tych punktach obydwaj wytwórcy osiągają dochody równe odpowiednio $(2400 - \epsilon, 2500)$ PLN. To rozwiązanie należy interpretować w sposób następujący: wytwórca G1 posiada zachęty do podnoszenia swojej ceny ofertowej do momentu, kiedy jego oferta jest przyjęta na 150 MWh oraz posiada przy tym najwyższą możliwą cenę ofertową, ale niższą od ceny ofertowej wytwórcy G2. Wytwórca G4 zaś nie posiada zachęt do podnoszenia swojej ceny ofertowej, gdyż cena węzłowa w węźle W2 jest wyznaczana przez wytwórcę G3. Gracz G4 posiada jedynie zachętę do tego, aby produkował jak najwięcej – czyli 150 MWh energii.

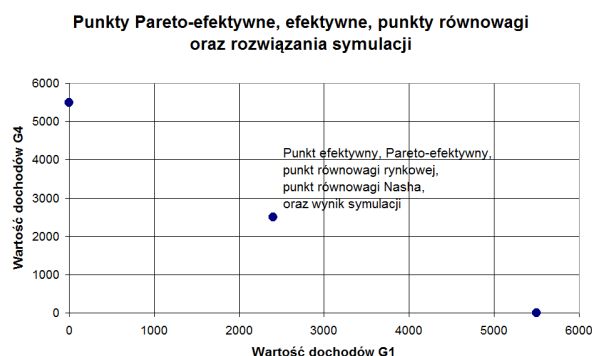
4.5. Symulacja gry rynkowej

W celu weryfikacji wcześniejszych wyników przeprowadzono również badania z wykorzystaniem metody symulacyjnej. W wyniku symulacji gry rynko-

wej pomiędzy graczami stosującymi opisaną wcześniej implementację strategii quasi-Best Response oferty wytwórców G1 i G4 ustabilizowały się na cenach odpowiednio 39,99 PLN oraz 25 PLN. Zgodnie z analizą przedstawioną w sekcji 4.4 punkt ten jest punktem równowagi Nasha (z $\epsilon=0,01$ PLN) oraz jest punktem globalnie efektywnym. Punkt równowagi gry zatem nie tylko istnieje, ale również jest osiągalny przy zastosowaniu zaimplementowanych strategii.

4.6. Analiza przestrzeni dochodów

Front Pareto, wyznaczony za pomocą analizy macierzy wypłat, składa się z trzech punktów (patrz Rys. 6). Jeden z tych punktów odpowiada sytuacji, gdy obydwaj gracze G1 i G4 produkują odpowiednio 150 MWh oraz 100 MWh energii. Rozliczani są oni po cenach odpowiednio $40 - \epsilon$ PLN/MWh oraz 50 PLN/MWh, osiągają oni wówczas dochody odpowiednio $2400 - \epsilon$ PLN oraz 2500 PLN. Jest to także punkt globalnie efektywny – dochody osiągane przez wszystkich wytwórców są maksymalne. Jest to także punkt odpowiadający punktom równowagi Nasha.



Rys. 6. Wynik w przestrzeni dochodów; punkty oznaczają punkty tworzące front Pareto

Wyniki symulacji oraz wynik dostarczony nam przez model równowagowy także zbiegają do tego punktu

5. PODSUMOWANIE

Zamodelowanie mechanizmu rynku bilansującego jako rozgrywki pomiędzy graczami umożliwia analizę jego cech z zastosowaniem narzędzi teorii gier. Szeroką właściwość, które nie są adresowane lub są trudne do analizy w ramach typowych metod badawczych poza teorią gier, może być w ten sposób poddanych analizie. Przykładami takich ważnych właściwości są punkty równowagi gry, ich stabilność, efektywność, możliwości ich osiągnięcia w trakcie rozgrywki. Narzędzia teorii gier, zastosowane do nietrywialnego przykładu ilustracyjnego, pozwoliły na analizę właściwości gry z różnych perspektyw. W rozważanym przypadku wyniki osiągnięte za pomocą trzech różnych narzędzi dały takie same wyniki, co wzmacnia

wiarygodność ocen. Należy zauważyć, iż dotychczasowa analiza niniejszego przykładu w literaturze była cząstkowa i pomijała aspekty potencjalnych rzeczywistych scenariuszy rozgrywki rynkowej (np. praca [7] i prace do niej nawiązujące).

Podstawowym wnioskiem niniejszej pracy jest potrzeba i zasadność uwzględnienia narzędzi teorii gier

w metodyce badawczej mechanizmów rynku bilansującego. W pracy pokazaliśmy, iż zastosowanie poszczególnych teoriogrowych narzędzi: modelu równowagowego, analizy przestrzeni dochodów, symulacji rozgrywki, jest możliwe oraz dostarcza interesujących wyników.

LITERATURA

- [1] Airiau S, Sen S, Saha S.: Evolutionary Tournament-based Comparison of Learning and Non-learning Strategies for Iterated Games. FLAIRS 2005, ss. 449-454, 2005.
- [2] Gabriel S., Smeers Y.: Complementarity Problems In Restructured Gas Markets. [w:] Recent Advances in Optimization, Springer, Berlin, s. 343-373, 2006.
- [3] Harker P.: Lectures on Computation of Equilibria with Equotation-Based Methods, CORE Lecture Series, Universite catholique de Louvain, Louvain-de-Neuve, Belgia, 1993.
- [4] Kaproń H.: Modelowanie procesów rynkowych w strukturze monopolu dystrybutora energii. Rynek Energii 2007, nr 5.
- [5] Nisam N., Roughgarden T., Tardos E., Vazirani V.: Algorithmic Game Theory. Cambridge University Press 2009.
- [6] Pareto V.: Manuel d'economie politique. Red. Wilson E. B., Bull. Amer. Math. Soc., 8, ss. 462-474.
- [7] Rosenberg, Alan E., Congestion Pricing or Monopoly Pricing? The Electricity Journal, Elsevier, vol. 13(3), pages 33-41, April, 2000.
- [8] Schwepe F.C.: Spot pricing of electricity. Kluwer Academic Publisher, New York 1988.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy nr N N516 375736

APPLICATION OF GAME THEORY TOOLS FOR ENERGY MARKET MECHANISMS ANALYSIS

Key words: balancing energy market, game theory

Summary. Complex market mechanisms may be analyzed using the game theory approach. In this paper we model power balancing market as a game between market participants. This approach allows us to examine some interesting market mechanism's properties from the game theory point of view. We use a few methods to analyze considered market game, like payoff matrix, game simulation and equilibrium models, used to find game equilibrium points. We use many different methods to obtain as broad knowledge about examined mechanisms as it is possible as well as to make our tests more reliable. In this paper we use a simple LMP balancing market model as an example and examine some interesting points in its solution space. Results of the analysis may be useful in designing and evaluating other power balancing market mechanisms.

Piotr Pałka, adiunkt w IAIIS, specjalność: zgodność motywacji w mechanizmach rynkowych, rynki energii elektrycznej, systemy wieloagentowe, e-mail: P.Palka@ia.pw.edu.pl

Przemysław Kacprzak, asystent w IAIIS, specjalność: badania operacyjne rynki wielotowarowe, e-mail: P.Kacprzak@elka.pw.edu.pl

Mariusz Kaleta, adiunkt w IAIIS, specjalność: badania operacyjne, informatyczne systemy zarządzania, projektowanie mechanizmów rynkowych, e-mail: mkaleta@ia.pw.edu.pl

Kamil Smolira, adiunkt w IAIIS, specjalność: badania operacyjne, mechanizmy rynkowe, e-mail: K.Smolira@ia.pw.edu.pl

Eugeniusz Toczyłowski, profesor, Kierownik Zakładu Badań Operacyjnych i Systemowych w IAIIS PW, specjalność: badania operacyjne i systemowe, metody strukturalne optymalizacji, informatyczne systemy zarządzania, projektowanie konkurencyjnych i efektywnych mechanizmów rynkowych, e-mail: E.Toczyłowski@ia.pw.edu.pl